نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۴۸-۳۳

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 33-48

مقاله پژوهشی

ذخیره کربن آلی و غیر آلی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک ساردوئیه در جنوب کرمان

حمیدرضا رفیعی[۱]- اعظم جعفری[۲*]- احمد حیدری[۳]- محمدهادی فرپور[۴]- احمد عباس‌نژاد[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

چکیده

کربن خاک که شامل کربن آلی و کربن غیر آلی می‌باشد، به دلیل تأثیر مهم آن بر گرمایش جهانی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. علی‌رغم اهمیت کربن موجود در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک در چرخه جهانی کربن، تحقیق در مورد ذخایر کربن در مقیاس خاکرخ در خاک‌های این مناطق به اندازه کافی انجام نشده است. در این مطالعه، توزیع عمودی و ذخیره کربن آلی، کربن غیر آلی و کربن کل در خاکرخ‌های خاک منطقه ساردوئیه (جنوب کرمان) واقع در اقلیم نیمه‌خشک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار کربن آلی خاک در افق‌های سطحی خاک بیشتر است و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. در حالی که کربن غیر آلی خاک در افق‌های سطحی خاک حداقل است و در افق‌های زیرسطحی افزایش می‌یابد. ذخیره کربن آلی خاک بین ۵/۵۲ تا $kg\ m^{-2}$ ۹/۴۸ و ذخیره کربن غیر آلی در خاکرخ‌های خاک بین ۱۴/۴۱ تا $kg\ m^{-2}$ ۹۱/۳۴ می‌باشد. سهم ذخیره کربن غیر آلی خاک از کربن کل خاک به‌طور متوسط ۷۷/۵ درصد است و حدود ۸۹ درصد آن در افق‌های زیرسطحی (زیر ۲۵ سانتی‌متر) ذخیره شده است. میانگین سهم ذخیره کربن آلی خاک از کربن کل خاک نیز ۲۲/۴ درصد می‌باشد. همچنین، نسبت ذخیره کربن غیر آلی به کربن آلی در خاکرخ‌های منطقه مورد مطالعه به طور متوسط ۴/۲۷ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیمی، توزیع عمقی کربن، کربن کل خاک، گرمایش جهانی

مقدمه

طبق گزارش کمیسیون بین دولتی تغییرات اقلیمی[۲] (IPCC)، مصرف سوخت‌های فسیلی از سال ۱۷۵۰ تاکنون منجر به انتشار ۵۵۵ پتاگرم[۳] (10^{15} گرم) کربن به اتمسفر شده است. با این حال، تنها ۴۳ درصد (۲۳۷/۸ پتاگرم کربن) از کربن انتشار یافته، در جو زمین باقی مانده است. در واقع، داده‌ها نشان می‌دهد که بین سال‌های ۱۷۵۰ و ۲۰۱۶ غلظت CO_2 از ۲۷۸ به ۴۰۶/۸ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافته است (۲۴). بخش قابل توجهی از کربن اتمسفر از طریق فتوسنتز، انحلال در آب سطحی و تبدیل به اشکال آلی و غیر آلی کربن از اتمسفر خارج می‌شود. افزایش میزان ترسیب کربن[۴] در خاک به‌عنوان یک روش برای کاهش نرخ افزایشی CO_2 در جو زمین پیشنهاد شده است (۸). خاک‌ها نقش مهمی در چرخه جهانی کربن دارند (۸ و ۴۰) و خاک، سومین مخزن بزرگ جهانی کربن است. همچنین، داده‌های مربوط به میزان ذخایر کربن خاک و تغییرات مداوم آن، از اجزای ضروری مدل‌های اقلیمی جهانی است (۹ و ۳۹).

کربن ذخیره شده در خاک متشکل از ذخایر کربن آلی خاک[۵] و کربن غیر آلی خاک[۶] است (۲۸ و ۴۴). بقایای تولیدشده توسط گیاهان (بخش هوایی و زیرزمینی) منبع اصلی کربن آلی خاک هستند (۴۵). کربن آلی از طریق تجزیه و تغییر شکل بقایای گیاهی توسط موجودات زنده خاک، در خاک تجمع می‌یابد. ذخایر کربن آلی خاک ارتباط مهمی در بازخورد بین تعادل جهانی کربن و تغییرات آب و هوایی دارند. به عنوان مثال، گرم شدن اقلیم، باعث تحریک تجزیه بیولوژیکی و افزایش نرخ تجزیه کربن آلی خاک می‌شود (۶). کربن غیر آلی خاک نیز عمدتاً از رسوب CO_2 حاصل از تنفس ریشه‌ها،

۱، ۲ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
(*- نویسنده مسئول Email:a.jafari@uk.ac.ir)
۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۵- دانشیار بخش زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهیدباهنر کرمان
DOI: 10.22067/jsw.v35i1.82133

2- Intergovernmental Panel on Climate Change
3- Petagrams
4- Carbon sequestration
5- Soil organic carbon
6- Soil inorganic carbon

جانوران و میکروارگانیسم‌ها به‌صورت کانی‌های کربناته از جمله $CaCO_3$ و $MgCO_3$ با گذشت زمان تجمع می‌یابد و یا از مواد مادری کربناتی به ارث می‌رسد. مخازن کربن غیر آلی خاک، از طریق یک سری فرایندهای فیزیکی و شیمیایی، از جمله ترسیب کربن به شکل کربنات، یا آزادسازی دی‌اکسید کربن طی اسیدی‌شدن خاک و یا آبشویی، تبادل کربن را با اتمسفر کنترل می‌کنند (۴۵). ترسیب کربن غیر آلی خاک شامل انتقال دی‌اکسید کربن اتمسفر به مخزن کربن خاک از طریق تشکیل کربنات ثانویه (خاک‌ساخت) می‌باشد. کربنات‌های خاک‌ساخت را بسته به منشأ اجزای تشکیل دهنده آن‌ها می‌توان به کربنات‌های خاک-سنگ‌ساخت[1] و خاک-اتمسفرساخت[2]، تقسیم‌بندی نمود (۵ و ۲۲). کربنات‌های خاک- سنگ‌ساخت از انحلال و رسوب مجدد کربنات‌های سنگ‌ساخت موجود از قبل (اولیه) تشکیل می‌شوند که ترسیب کربن خالص ندارند. در مقابل، کربنات‌های خاک- اتمسفرساخت طی فرایند نوتشکیلی[3] از کلسیم دارای منشأ برون‌زاد[4] تشکیل و در ترسیب نهایی کربن وارد می‌شوند (۵ و ۲۰). منشأ برون‌زاد کلسیم شامل هوازدگی سیلیکات‌های کلسیم‌دار، افزایش کلسیم غیرکربناتی از طریق جو، آبیاری و کاربرد لجن و کودهای شیمیایی معدنی می‌باشد. فراهم شدن یون کلسیم یا سایر کاتیون‌های دخیل در تشکیل کربنات‌های خاک‌ساخت، یک ضرورت است (۵).

اگرچه بیشتر تحقیق‌ها در مورد کربن خاک بر روی کربن آلی خاک متمرکز شده است، ولی کربن غیر آلی خاک تقریباً ۴۰ درصد از کربن خاک را در سطح جهان تشکیل می‌دهد و در مناطق خشک و نیمه خشک شکل غالب ذخیره کربن است و حدود ۲ تا ۱۰ برابر بیش‌تر از کربن آلی خاک می‌باشد (۳۹). همچنین، اکثر مطالعات پیشین بر روی ذخایر کربن در خاک سطحی متمرکز شده است، در حالی که در مورد پویایی اشکال کربن در خاک زیر سطحی اطلاعات اندکی وجود دارد. به‌عنوان مثال، علی‌دوست و همکاران (۲) پتانسیل ترسیب کربن آلی خاک را در کاربری‌های مختلف اراضی از جمله جنگل، مرتع و مزارع آبی در منطقه نیمه‌خشک لردگان در اعماق ۵-۰، ۱۵-۵ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری مورد بررسی قرار دادند. عجمی و همکاران (۱) نیز در پژوهش خود ذخیره کربن آلی را در مناطق نیمه مرطوب شمال ایران در کاربری‌های جنگل، زمین‌های زراعی و باغ مورد بررسی قرار دادند. مطالعه‌های متعددی وجود دارند که کربن غیر آلی خاک را به‌عنوان یک منبع ذخیره کربن در نظر نگرفته‌اند. احتمالاً دلیل این مسئله زمان طولانی‌تر مورد نیاز برای ایجاد تغییر در کربنات‌ها در مقایسه با کربن آلی خاک می‌باشد (۳۱ و ۴۳). با این حال، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که موجودات زنده خاک نقش مهمی را در تولید کربنات‌های ثانویه ایفا می‌کنند که اشاره به تغییرات بالقوه سریع در کربن غیر آلی خاک دارد (۱۶). در اکثر مطالعات، ارزیابی هر دوی کربن آلی و کربن غیر آلی خاک نادیده گرفته شده است (۴۲). به‌طور کلی، کربن آلی خاک با بارش افزایش می‌یابد، اما با عمق خاک به دلیل فرآیندهای بیولوژیکی از جمله تولید پوشش گیاهی و ورودی بقایای گیاهی کاهش می‌یابد. با این حال، تغییر در کربن غیر آلی خاک با بارش[5] و با عمق خاک به دلیل داده‌های محدود، مبهم است. به‌عنوان مثال، گزارش‌هایی از کاهش (۲۸) و افزایش (۴۱) در کربن غیر آلی خاک با افزایش بارندگی وجود دارد. توزیع عمودی کربن غیر آلی خاک عموماً به‌صورت پایدار[6] (۱۲)، صعودی (۴۰) و نزولی (۴۱) مشاهده شده است. ژانگ و همکاران (۴۴) نشان دادند که ذخیره کربن غیر آلی خاک در لایه ۲۰۰-۱۰۰ سانتی‌متری خاک، ۵۰ درصد از ذخیره کربن در عمق ۲۰۰-۰ سانتی‌متری را تشکیل می‌دهد. بنابراین، کربن ذخیره شده در لایه‌های عمقی خاک (زیر ۱۰۰ سانتی‌متر) به همان اندازه لایه‌های سطحی برای تخمین ذخیره کل کربن مهم است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که یک سوم از سطح زمین را پوشانده‌اند، ذخایر کربن غیر آلی و پویایی آن حائز اهمیت است، زیرا در این مناطق نرخ انباشت کربن غیر آلی به‌طورکلی بیشتر از دیگر زیست‌بوم‌ها (بیوم‌ها[7]) است (۱۸ و ۲۷).

درک توزیع ذخایر کربن آلی و غیر آلی در خاکرخ خاک برای ارزیابی ذخایر کربن خاک در مقیاس منطقه‌ای و جهانی و پیش‌بینی عواقب تغییر جهانی[8] ضروری است. اگرچه برآوردهای جهانی یک دیدگاه کلی از میزان ذخیره کربن ارائه می‌دهند، برآوردهای محلی دقیق و عوامل مؤثر بر پویایی کربن خاک از دیدگاه مدیریت بسیار مهم می‌باشند (۳۸). در نتیجه، یک نیاز ضروری برای برآورد دقیق توزیع ذخیره کربن و تفاوت‌های آن با توجه به خواص خاک وجود دارد. در ایران، مطالعات بسیار اندکی تا به امروز به‌منظور بررسی توزیع و ذخیره‌سازی پروفیلی کربن آلی و کربن غیر آلی خاک در کاربری‌ها و اکوسیستم‌های مختلف انجام شده است. به‌عنوان مثال، راهب و همکاران (۲۷ و ۲۸)، ذخیره‌سازی کربن آلی، کربن غیر آلی و کربن کل خاک را در طول یک توالی اقلیمی خشک تا نیمه مرطوب در خاک‌های تشکیل شده بر روی سنگ مادر بازالتی در شمال غرب ایران مورد بررسی قرار دادند. بنابراین، با توجه به موارد فوق، مطالعه

1- Pedo-lithogenic
2- Pedo-atmogenic
3- Neoformation
4- Exogenous
5- Precipitation
6- Stable
7- Biomes
8- Global change

حاضر جهت کمّی‌کردن ذخیره کربن آلی و کربن غیر آلی خاک و توزیع عمودی آن‌ها، بررسی ارتباط بین کربن آلی با کربن غیر آلی و تعیین سهم ذخیره کربن در خاک‌های عمقی به کل ذخیره کربن در خاک‌های درجا توسعه‌یافته از مواد مادری آذرین در منطقه ساردوئیه کرمان واقع در اقلیم نیمه‌خشک انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

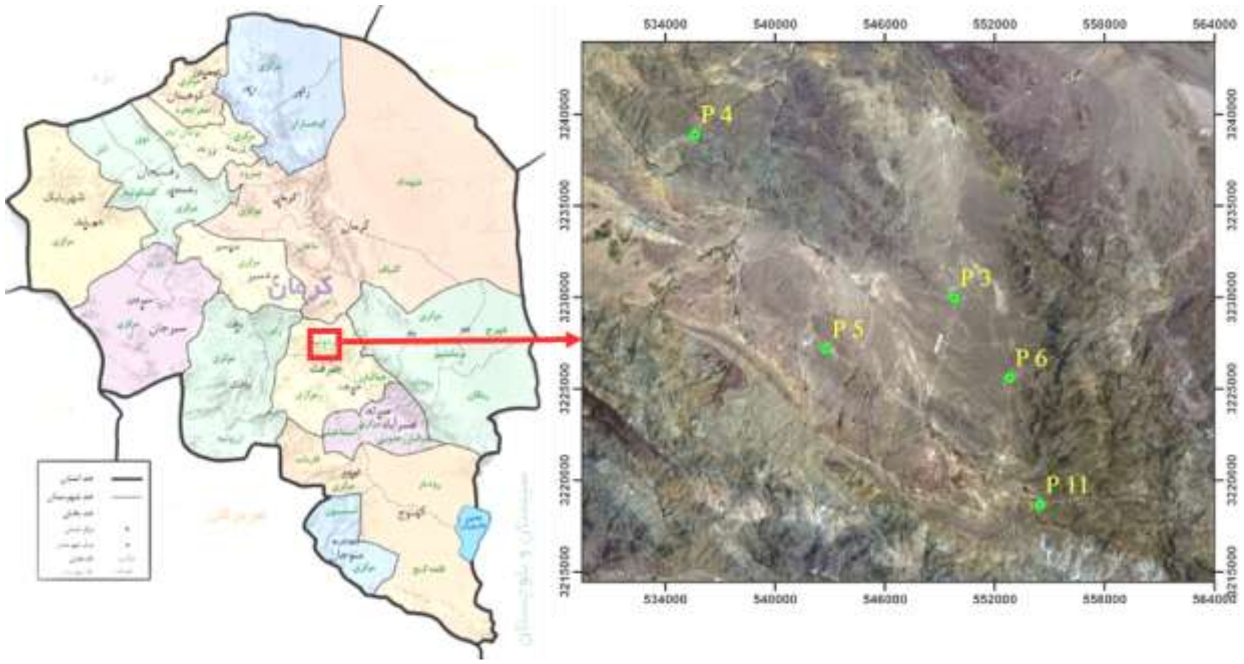
محدوده مورد مطالعه به وسعت حدود ۱۲۰ کیلومتر مربع در منطقه ساردوئیه (۲۹/۳-۲۹/۱ درجه شمالی و ۵۷/۶-۵۷/۴ درجه شرقی) در جنوب شهرستان کرمان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع منطقه از سطح دریا به‌طور متوسط ۲۸۰۰ متر می‌باشد و اختلاف ارتفاع محلی حدود ۴۰۰ متر است. میانگین دمای سالانه منطقه حدود ۱۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه حدود ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. طبق طبقه‌بندی دومارتن بسط‌یافته برای نواحی اقلیمی (۲۹)، منطقه مورد مطالعه در کلاس نیمه‌خشک قرار دارد. بر اساس معیارهای سیستم طبقه‌بندی آمریکایی خاک، این منطقه دارای رژیم رطوبتی تیپیک زریک و رژیم حرارتی مزیک می‌باشد (۳۷). پوشش گیاهی منطقه عمدتاً پوشش مرتعی نیمه متراکم تا متراکم از نوع درمنه (*Artemisia*) و مواد مادری از نوع آذرین حدواسط و عمدتاً از نوع دیوریت است.

نمونه‌برداری خاک

با توجه به وسعت منطقه و مشاهدات صحرایی، تعداد ۵ خاکرخ در منطقه حفر، تشریح و نمونه‌های خاک از افق‌های ژنتیکی خاک برداشته شد (۳۵). طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع محل حفر خاکرخ‌ها با استفاده از دستگاه GPS ثبت و رده‌بندی خاک‌ها با استفاده از سیستم طبقه‌بندی آمریکایی (۳۷) انجام شد. خاکرخ‌های انتخاب شده به‌صورت درجا از سنگ‌های آذرین زیرین آن‌ها و تحت پوشش بومی مرتعی توسعه یافته‌اند. موقعیت خاکرخ‌ها در بالای تپه‌ها و یا نزدیک به قلّه و دارای شیب کم انتخاب گردید. نوع سنگ آذرین و ترکیب مینرالوژیکی آن‌ها با توجه به سنگ‌های برداشته شده از سنگ بستر پروفیل‌ها تعیین گردید. شناسایی سنگ‌ها با استفاده از مقاطع نازک تهیه شده از سنگ‌ها با میکروسکوپ پتروگرافی انجام شد.

آماده‌سازی و تجزیه نمونه‌ها

نمونه‌ها ابتدا هوا خشک و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و درصد وزنی بخش نرم (mm 2>) و قطعات درشت (mm 2<) تعیین گردید. درصد حجمی قطعات درشت نیز محاسبه شد (۱۴).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و مکان پروفیل‌های حفر و تشریح شده

Figure 1- Location of the studied area and the excavated profiles

جرم مخصوص ظاهری خاک بـا وزن کـردن نمونـه‌هـای دسـت نخورده خاک تهیه شده با روش استوانه بعد از خشک کردن نمونه‌ها به مدت یک شـب در دمـای ۱۰۵ درجـه سـانتی‌گـراد و تقسـیم وزن خشک نمونه به حجم استوانه بـه دسـت آمـد (۱۴). جـرم مخصـوص ظاهری با استفاده از روش پوپلو و همکاران (۲۶) تصحیح و سپس در محاسبات استفاده گردید. بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتر پس از پراکنده کردن نمونه‌ها به مدت یک شب در محلول ۵ درصد هگـزا متا فسفات سدیم تعیین شد (۱۴). pH خاک در گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر مدل Jenway و هـدایت الکتریکـی در عصـاره گـل اشباع با دستگاه هدایت‌سنج مدل Jenway اندازه‌گیری شد. کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تَر در حضـور دی‌کرومـات‌پتاسـیم- اسـید سولفوریک (۲۳) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بـا اسـتفاده از اسـتات سدیم در pH=8.2 تعیین شد (۴). کربن غیر آلی خاک بـا اسـتفاده از روش وزنی سنجش کربنات[1] تعیین گردید (۳۲). به‌طور خلاصـه، ۰/۲ گرم خاک با دقت ۰/۰۰۰۱ وزن گردید و سپس داخـل ارلـن مـایر ۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد. بعد از آن، یک ظرف شیشه‌ای استوانه‌ای حـاوی ۴ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۴ نرمال به‌علاوه ۳ درصد $FeCl_2.4H_2O$ داخل ارلـن مـایر قـرار داده شـد. پـس از آن، درب ارلـن بـا درپـوش پلاستیکی سوراخ‌دار بسته شد و وزن اولیه آن با دقـت ۴ رقـم اعشـار یادداشت گردید. سپس، با ضربه کـوچکی بـه انتهـای ارلـن محتـوای ظرف شیشه‌ای روی خاک ریختـه شـد و پـس از گذشـت حـدود ۲۴ ساعت از شروع واکنش، وزن نهایی ارلن با محتویات آن انـدازه‌گیـری شد و درصد کربن غیر آلی خاک محاسبه گردید.

محاسبات

درصد کربن غیر آلی (SIC) در هـر نمونـه خـاک بـا اسـتفاده از معادله ۱ محاسبه گردید (۳۱):

$$SIC(\%) = \frac{Net\ \mathrm{CO_2\ sample\ (g)}}{soil\ \mathrm{sample\ (g)}} \times 0.2727 \times 100 \qquad \text{معادله ۱}$$

CO_2 خالص (Net) از تفـاوت بـین CO_2 ناخـالص و وزن آب از دست رفته از نمونه شاهد (نمونه شنی فاقد کربن غیر آلی) بـه دسـت می‌آید. همچنین، CO_2 ناخالص از تفاضل بین وزن نهایی و اولیه هـر نمونه خاک محاسبه می‌شود. ضریب ۰/۲۷۲۷ در فرمول بـالا مربـوط به نسبت جرم اتمی کربن به دی‌اکسید کربن می‌باشد.

ذخیره کربن آلی (SOCs) و کربن غیـر آلـی (SICs) بـرای هـر پروفیل خاک ($kg\ m^{-2}$) با تعداد k افق با اسـتفاده از معـادلات ۲ و ۳ محاسبه شدند (۳۸):

$$SOC_S = \sum_{i=1}^{k} SOC_i \times h_i \times \rho_{i\ <2\mathrm{mm}} \left[1 - S_i\right] \times 10^3 \qquad \text{معادله ۲}$$

$$SIC_S = \sum_{i=1}^{k} SIC_i \times h_i \times \rho_{i\ <2\mathrm{mm}} \left[1 - S_i\right] \times 10^3 \qquad \text{معادله ۳}$$

در روابط ۲ و ۳، SOC_i و SIC_i به ترتیـب بخـش کـربن آلـی و کربن غیر آلی خاک برای هر افق برحسب گـرم کـربن در یـک گـرم خاک ($g\ C\ g^{-1}\ Soil$) می‌باشد. h_i ضخامت هر افـق خـاک برحسـب متر، ρ_i جرم مخصوص ظاهری افق i ($Mg\ m^{-3}$) و S_i کسـر حجمـی سنگریزه خاک برای هر افق می‌باشد. کل ذخیره کربن خاک (STC_s) از جمع ذخایر کربن آلی خاک (SOC_s) و کربن غیر آلی خاک (SIC_s) محاسبه می‌شود. علاوه بر این، بـرای درک اهمیـت اشـکال مختلـف کربن در خاک‌های زیرسطحی، ذخیره کربن آلـی، کـربن غیـر آلـی و کربن کل خاک در عمق‌های ۰-۲۵، ۲۵-۶۰ و ۶۰-۱۲۰ سانتی‌متر بـا استفاده از تابع اسپلاین[2] (Lambda=۰/۱) تعیین گردید (۳).

نتایج و بحث

ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک‌ها

جدول ۱ برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی خاکرخ‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افق سطحی تمـامی خاکرخ‌ها به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم و ماده آلی زیاد (۱/۱ تا ۳/۲ درصد) دارای ساختمان گرانولار (کروی) مـی‌باشـد، در حـالی‌کـه ساختمان خاک در افق‌های زیرین (افق B) عمـدتاً از نـوع سـاختمان مکعبی است. همچنین خاک‌های مورد مطالعه در تمـامی افـق‌هـا بـه دلیل تشکیل درجا[3] و بر روی سـاپرولیت دارای سـنگریزه مـی‌باشـند. تجمع کربنات کلسیم خـاک‌سـاخت (پـدوژنیک) بـه شـکل پـودری و گرهک (Nodule) به مقادیر مختلف در افق‌هـای خـاک بـه وضـوح قابل مشـاهده اسـت (۳۵) (شـکل ۲). گیـل و همکـاران (۱۱) تجمـع کربنات کلسیم را توسط چهار مرحله متوالی با توجه به وجود یـا عـدم وجود سنگریزه توصـیف نمودنـد کـه مرحلـه I حـداقل و مرحلـه IV بیشترین توسعه افق تجمع کربنات کلسیم را دارد. به لحاظ طبقه‌بندی گیل و همکاران (۱۱)، پروفیل‌های مورد مطالعـه در مرحلـه II تـا III قرار دارند. رنگ طول موج غالب خاک (هیو[4]) مطـابق دفترچـه رنـگ مانسل در افق‌های سطحی 10YR می‌باشد، در حـالی کـه بـا تجمـع کربنات کلسیم در افق‌های زیرین رنگ طول موج غالب خـاک 5Y و 2.5Y می‌باشد.

1- Gravimetric carbonate meter

2- Spline function
3- Residual
4- Hue

جدول ۱- ویژگی‌های مورفولوژیکی خاکرخ‌های مورد مطالعه (۲۹)

Table 1- Morphological characteristics of the studied profiles

افق Horizon	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)	ساختمان Structure+	مرز افق Boundary++	سنگریزه CF (%V)	رنگ Color خشک Dry	مرطوب Moist
Pedon No. 3- Calcic Haploxeralfs						
A	0-15	gr f-1vf	C,S	31	10YR 6/3	10YR 4/4
Btkk1	15-50	abk co-2m	G,S	10	5Y 8/1	5Y 7/2
Btkk2	50-70	sbk f-1vf	C,W	15	5Y 8/1	5Y 7/2
Ck	70-110	-	C,W	22	5Y 8/1	5Y 7/2
Cr	110-155	-	-	21	5Y 8/1	5Y 6/2
Pedon No. 4- Typic Cacixerepts						
A	0-20	gr f-2vf	C,S	20	10YR 7/2	10YR 5/4
AB	20-30	co abk-2m	C,S	9	10YR 7/2	10YR 5/4
Bk1	30-55	m sbk-2f	G,S	17	2.5Y 8/2	2.5Y 6/4
Bk2	55-95	1f sbk	G,S	27	5Y 8/2	5Y 6/4
Ck	95-125	-	C,W	28	5Y 8/3	5Y 6/4
Cr	125-145	-	-	24	5Y 8/3	5Y 6/4
Pedon No. 5- Typic Cacixerepts						
A	0-25	f gr-1vf	C,S	17	10YR 7/2	10YR 4/3
Bk	25-55	m abk-2f	C,S	9	10YR 7/2	10YR 5/3
C	55-75	-	C,S	27	10YR 7/2	10YR 5/3
Cr	75-100	-	G,W	39	10YR 7/2	10YR 4/3
Pedon No. 6- Typic Cacixerepts						
A	0-15	gr f-1vf	A,S	19	10YR 6/3	10YR 4/4
Bk	15-65	abk 1f	C,S	32	10YR 7/2	10YR 5/3
Ck	65-95	-	C,S	33	10YR 7/2	10YR 5/3
Cr	95-130	-	-	51	10YR 7/2	10YR 5/3
Pedon No. 11- Typic Cacixerepts						
A	0-25	m gr-2f	C,S	16	10YR 6/4	10YR 4/4
Bk1	25-70	abk co-2m	C,S	23	10YR 7/3	10YR 5/4
Bk2	70-95	abk m-2f	C,S	32	10YR 6/3	10YR 5/4
C	95-150	-	-	29	2.5Y 7/4	2.5Y 5/4

+ کلاس ساختمان خاک: درجه وضوح: ۱: ضعیف، ۲: متوسط، اندازه: vf: خیلی ریز، f: ریز، m، متوسط، co، درشت، نوع: gr: کروی، abk: بلوکی زاویه‌دار، sbk: بلوکی بدون زاویه

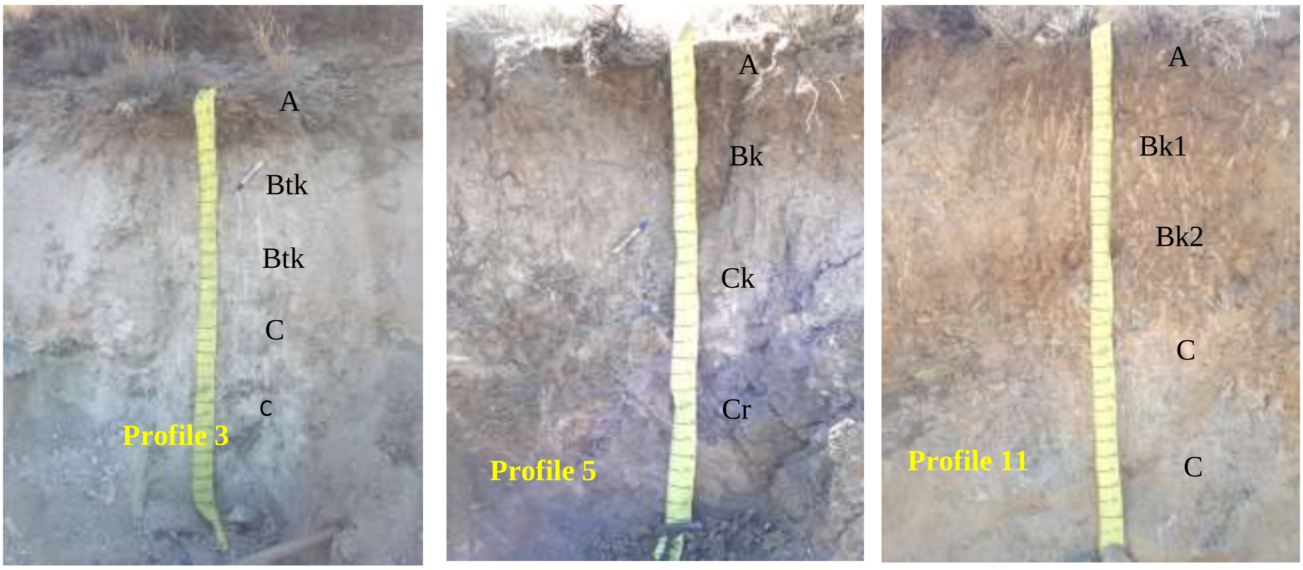
++ مرز افق‌ها: تمایز: A: ناگهانی، C: واضح، G: تدریجی، ناهمواری: S: صاف، W: موجدار

عاملی که بیشترین تأثیر را بر رنگ خاک دارد، کانی‌شناسی رس[۱] است. خاک‌های قرمز معمولاً غنی از هماتیت، خاک‌های قهوه‌ای غنی از گوتیت هستند و خاک‌های سفید می‌توانند سرشار از نمک یا کانی‌های کربناتی باشند (۳۳). ضخامت سولوم خاک[۲] (مجموع افق‌های A+B) بین ۵۵ تا ۹۵ سانتی‌متر متغیر می‌باشد و به‌طور متوسط ۷۵ سانتی‌متر ضخامت دارد.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و رده‌بندی پروفیل‌های خاک منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود، خاک‌های منطقه در دو رده آلفی‌سول و اینسپتی‌سول طبقه‌بندی شده‌اند. با توجه به اقلیم نیمه‌خشک در منطقه، شستشوی کربنات کلسیم ثانویه تا عمق ۱۲۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. ضخامت افق کلسیک در پروفیل‌های مورد مطالعه بین ۳۰ تا ۹۵ سانتی‌متر متغیر است. میزان هدایت الکتریکی در پروفیل‌های خاک به دلیل بارندگی مناسب (حدود ۴۰۰ میلی‌متر)، نسبتاً کم است و حداکثر ۲/۹ دسی‌زیمنس بر متر در افق Ck پروفیل ۳ می‌باشد و عموماً در گروه خاک‌های غیرشور قرار دارند (۳۳).

1- Clay mineralogy
2- Soil solum



شکل ۲- نمایی از خاکرخ‌های مورد مطالعه. تشکیل درجای پروفیل‌ها و توسعه افق‌ها و سنگ بستر هوازده (ساپرولیت)

Figure 2- View of the studied profiles. Residual formation of profiles and development of horizons and Saprolite

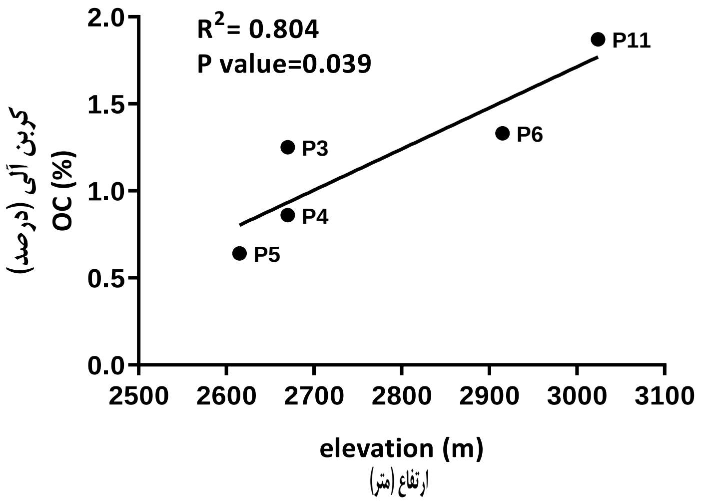
به دلیل وجود پوشش گیاهی با تراکم متوسط، در تمامی پروفیل‌ها، حداکثر کربن آلی در افق‌های سطحی (افق A) مشاهده شد که با افزایش عمق کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع در منطقه مقدار ماده آلی در افق سطحی افزایش نشان داد، به‌طوری‌که از ۰/۶۴ درصد در افق سطحی پروفیل ۵ با ارتفاع ۲۶۱۵ متر به ۱/۸۷ درصد در افق سطحی پروفیل ۱۱ با ۳۰۲۴ متر ارتفاع افزایش یافته است. شکل ۳ ارتباط بین ارتفاع محل حفر پروفیل با کربن آلی افق سطحی را نشان می‌دهد. به دلیل درجه حرارت کمتر و رطوبت بیشتر در ارتفاعات، درصد کربن آلی خاک بیشتر است که به علت کاهش تجزیه مواد آلی در ارتفاعات بالاتر می‌باشد (۱۰). در ارتفاعات بالاتر (خاکرخ ۱۱) بارندگی عمدتاً به شکل برف می‌باشد. به‌طور کلی با فزایش هر ۱۰۰۰ متر ارتفاع، دمای هوا، ۶/۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد (۲۵). پایین بودن pH در افق سطحی پروفیل‌ها عمدتاً به دلیل بالا بودن ماده آلی و تنفس ریشه‌های زنده و موجودات خاکزی است که سبب افزایش فشار دی‌اکسید کربن شده و در واکنش با آب به اسیدکربنیک تبدیل می‌شود که سبب کاهش pH خاک می‌گردد (۱۷). مقدار کربنات کلسیم معادل در افق‌های سطحی به دلیل انحلال کربنات‌ها و شستشوی آن‌ها به اعماق پایین‌تر، حداقل است و با افزایش عمق افزایش می‌یابد و عمدتاً در افق‌های میانی پروفیل‌ها تجمع یافته است (۴۵).

کربن آلی و کربن غیر آلی خاک

مقادیر کربن آلی و کربن غیر آلی خاک جهت کمّی‌کردن مقدار ذخیره کربن در پروفیل‌های خاک اندازه‌گیری شد. جدول ۳ مقدار کربن آلی و کربن غیر آلی و همچنین ذخیره کربن آلی، کربن غیر آلی و کربن کل افق‌های خاک را با توجه به ضخامت آن‌ها نمایش می‌دهد. در افق‌های سطحی خاک، کربن آلی خاک بیشتر (۷ و ۱۳) و کربن غیر آلی خاک کمتر است و با یکدیگر همبستگی منفی نشان می‌دهند (شکل ۴). به نظر می‌رسد که افزایش فعالیت میکروبی و تجزیه کربن آلی خاک و در نتیجه تولید CO_2 بیشتر در افق‌های سطحی، منجر به کاهش کربن غیر آلی خاک می‌شود. گاز CO_2 آزاد شده از تجزیه مواد آلی با رطوبت خاک واکنش داده و تولید HCO_3^- می‌کند که در نهایت توسط فرایندهای آبشویی به کربنات کلسیم تبدیل می‌شود. در نتیجه، کربن از دست رفته از مواد آلی به شکل غیر آلی ترسیب می‌شود (۱۷). همچنین، افزایش غلظت CO_2 خاک منجر به تولید H^+ می‌شود. هنگامی که H^+ به اندازه کافی برای ایجاد شرایط اسیدی وجود داشته باشد، انحلال کربنات کلسیم ممکن است رخ دهد که سبب برقراری ارتباط منفی بین کربن آلی خاک و کربن غیر آلی خاک می‌گردد (۱۷ و ۴۵). بیشتر بودن زیست‌توده میکروبی خاک می‌تواند کربن آلی ناپایدار را معدنی کند و CO_2 بیشتری تولید نماید. CO_2 تولیدشده در محلول خاک حل می‌شود و به CO_3^{2-} تبدیل می‌شود. CO_3^{2-} حاصل می‌تواند بوسیله رسوب با یون Ca^{2+} که از تجزیه لاشبرگ‌ها و کانی‌های سیلیکاته آزاد شده است، $CaCO_3$ را در خاک تشکیل می‌دهد.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکرخ‌های مورد مطالعه
Table 2- Some physical and chemical properties of the studied profiles

افق Horizon	عمق Depth (cm)	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	واکنش خاک pH	شن Sand (%)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	بافت خاک Texture	کربنات کلسیم معادل CCE (%)	کربن آلی OC (%)	نسبت جذب سدیم SAR (mmol L^{-1})$^{0.5}$	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol$_c$ kg^{-1})
Pedon 3- Calcic Haploxeralfs, 2670 m											
A	0-15	1.68	7.56	44	15	41	loam	10	1.25	1.84	13.40
Btkk1	15-50	0.75	7.66	9	49	42	silty clay	63.25	0.88	2.70	18.69
Btkk2	50-70	1.14	7.78	22	43	34	clay	63	0.70	2.73	16.85
Ck	70-110	2.97	8.01	33	35	31	clay loam	49.25	0.51	9.47	17.76
Cr	110-155	1.33	8.82	37	29	34	clay loam	39.25	0.29	9.95	18.69
Pedon 4- Typic Calcixerepts, 2670 m											
A	0-20	0.48	7.91	49	22	29	loam	9.75	0.86	1.13	15.08
AB	20-30	0.79	7.77	44	35	21	clay loam	12	0.86	1.98	17.76
Bk1	30-55	0.67	7.90	33	40	27	clay	19	0.68	2.56	32.59
Bk2	55-95	0.98	7.85	44	23	32	loam	16.25	0.51	4.88	33.79
Ck	95-125	0.71	7.85	47	21	32	loam	19.5	0.45	1.97	33.79
Cr	125-145	0.85	7.89	58	15	27	sandy loam	18.75	0.20	1.70	33.79
Pedon 5- Typic Calcixerepts, 2615 m											
A	0-25	1.06	7.91	66	5	28	sandy loam	7.5	0.64	2.61	29.09
Bk	25-55	0.36	7.90	58	13	28	sandy loam	12.75	0.47	1.13	49.11
C	55-75	0.39	7.73	79	9	12	sandy loam	11	0.45	1.17	75.59
Cr	75-100	0.63	7.76	79	9	12	sandy loam	16.25	0.33	2.55	72.72
Pedon 6- Typic Calcixerepts, 2915 m											
A	0-15	1.36	7.76	44	18	37	loam	4	1.33	2.88	18.69
Bk	15-65	0.32	7.96	75	7	17	sandy loam	10.5	0.39	1.15	15.96
Ck	65-95	0.47	8.08	68	18	13	sandy loam	13	0.37	0.42	16.85
Cr	95-130	0.57	7.93	72	8	19	sandy loam	8	0.23	2.95	17.76
Pedon 11- Typic Calcixerepts, 3024 m											
A	0-25	0.90	7.32	33	29	38	clay loam	1.5	1.87	0.81	22.62
Bk1	25-70	0.91	7.82	23	29	48	clay loam	15.5	0.55	4.22	19.64
Bk2	70-95	0.27	7.93	31	36	32	clay loam	11.5	0.39	0.72	25.76
C	95-150	0.28	8.08	45	28	27	clay loam	28.25	0.39	0.55	20.61



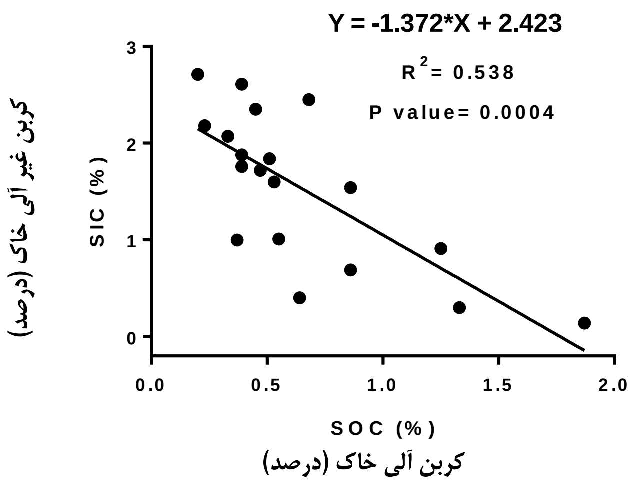
شکل ۳- ارتباط بین ارتفاع منطقه و درصد کربن آلی افق سطحی (A) در خاکرخ‌های مورد مطالعه (P3, P4, P5, P6, P11)

Figure 3- Relationship between elevation and the organic carbon percentage of the surface horizon (A) in the studied profiles (P3, P4, P5, P6, and P11)

جدول ۳- مقادیر ذخیره کربن آلی، کربن غیر آلی و کربن کل در افق‌های مختلف پروفیل‌ها

Table 3- Organic carbon, inorganic carbon and total carbon storage contents in various horizons of the profiles.

افق **Horizon**	جرم مخصوص ظاهری **BD_f ($g\ cm^{-3}$)**	کربن آلی خاک **SOC (%)**	کربن غیر آلی خاک **SIC (%)**	ذخیره کربن آلی خاک **SOCs ($kg\ m^{-2}$)**	ذخیره کربن غیر آلی خاک **SICs ($kg\ m^{-2}$)**	ذخیره کربن کل خاک **STCs ($kg\ m^{-2}$)**
Pedon 3						
A	1.42	1.25	0.91	1.84	1.34	3.18
Btkk1	1.12	0.88	7.48	3.08	26.29	29.38
Btkk2	1.13	0.70	7.64	1.34	14.59	15.93
Ck	1.20	0.51	6.11	1.91	23.07	24.98
Cr	1.25	0.29	5.86	1.30	26.05	27.35
Pedon 4						
A	1.35	0.86	0.69	1.84	1.49	3.33
AB	1.25	0.86	1.54	0.98	1.75	2.73
Bk1	1.18	0.68	2.45	1.68	6.04	7.72
Bk2	1.28	0.51	1.84	1.89	6.86	8.75
Ck	1.24	0.45	2.35	1.20	6.31	7.51
Cr	1.25	0.20	2.71	0.38	5.13	5.51
Pedon 5						
A	1.67	0.64	0.40	2.23	1.37	3.59
Bk	1.26	0.47	1.72	1.62	5.95	7.57
C	1.35	0.53	1.60	1.04	3.16	4.20
Cr	1.25	0.33	2.07	0.63	3.93	4.56
Pedon 6						
A	1.45	1.33	0.30	2.32	0.52	2.85
Bk	1.46	0.39	1.88	1.93	9.30	11.23
Ck	1.47	0.23	2.18	0.69	6.39	7.08
Cr	1.40	0.37	1.00	0.89	2.42	3.31
Pedon 11						
A	1.15	1.87	0.14	4.53	0.33	4.86
Bk1	1.36	0.55	1.76	1.83	8.26	10.09
Bk2	1.24	0.39	1.01	1.16	2.14	3.30
C	1.21	0.39	2.61	1.86	12.43	14.29



شکل ۴- رابطه رگرسیونی بین کربن غیر آلی خاک و کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه

Figure 4- Relationship between SIC and SOC in studied soils

همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، در اکثر پروفیل‌ها ذخیره کربن آلی در افق‌های سطحی بیشتر است و با افزایش عمق روند کاهشی را نشان می‌دهد. مقدار کربن آلی خاک به‌طور مستقیم با منابع ورودی کربن مشتق‌شده از گیاهان در ارتباط است. به‌طور

کلی، تجمع کربن آلی در خاک سطحی عمدتاً از ورود کربن از بقایای گیاه که شامل قسمت فوقانی و زیست‌توده ریشه‌ای است، مشتق می‌شود (۳۰).

روند تغییرات در خصوص ذخیره کربن غیر آلی با ذخیره کربن آلی متفاوت است، به طوریکه در افق‌های سطحی حداقل و در افق‌های زیرسطحی مقدار آن افزایش می‌یابد. کربن کل خاک نیز روند مشابهی را با کربن غیر آلی نشان می‌دهد و در افق‌های زیرسطحی بیشتر از افق‌های سطحی می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مقادیر زیادی کربنات کلسیم پدوژنیک (کربن غیر آلی) در خاک‌هایی که مواد مادری آن‌ها از قبل فاقد کربنات کلسیم بوده‌اند، تشکیل می‌شود (۲۱). در این مناطق، کربنات کلسیم پدوژنیک از آزادسازی کلسیم در اثر هوادیدگی شیمیایی سنگ‌ها و کانی‌های غیرکربناته کلسیم‌دار مانند فلدسپارهای کلسیم‌دار و رسوب کربنات کلسیم زمانی که آب خاک توسط تبخیر یا جذب توسط گیاه از دست می‌رود، تشکیل می‌شود (۱۵). در مورد کانی‌های سیلیکاته مواد مادری مانند پلاژیوکلازها (فلدسپار کلسیم‌دار) واکنش مربوط به هوازدگی به صورت معادله ۴ است (۳۴):

$$CaAl_2Si_2O_8 + 3H_2O + 2CO_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^- + Al_2Si_2O_5(OH)_4 \quad \text{معادله ۴}$$

در این واکنش، کلسیم از کانی‌های سیلیکاته تحت تأثیر اسید کربنیک که از انحلال CO_2 در آب تشکیل شده است، آزاد می‌شود. کاهش میزان آب یا CO_2 در خاک، کربنات را مطابق واکنش ۵ در خاک رسوب می‌دهد.

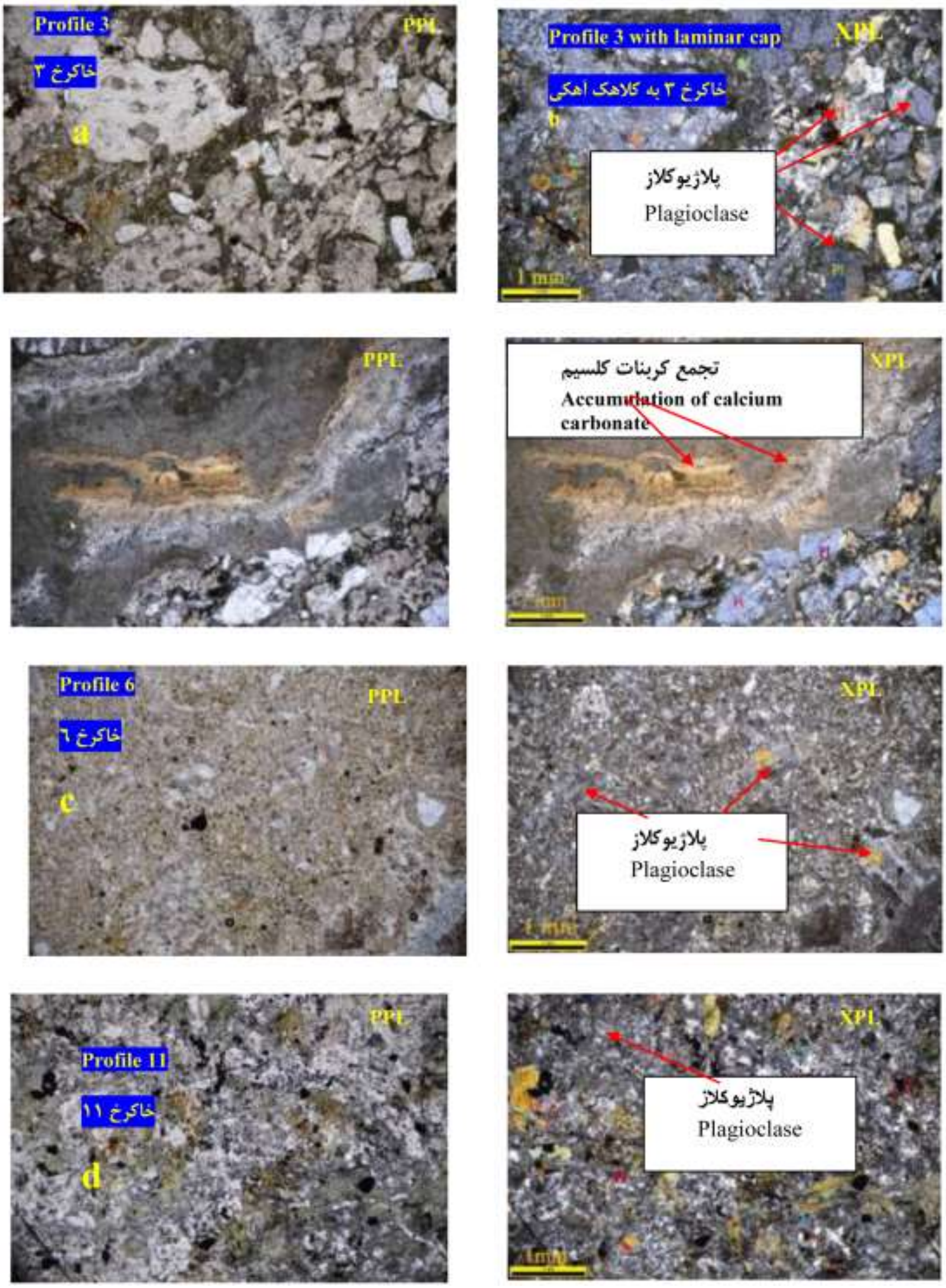
$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O + CO_2 \quad \text{معادله ۵}$$

در این واکنش‌ها HCO_3^- از فعالیت ریشه‌ها و تنفس میکروبی تولید می‌شود. تأمین کلسیم فراوان از هوادیدگی شیمیایی فلدسپارهای کلسیم‌دار، واکنش را در حضور مقدار کافی از HCO_3^- به سمت راست پیش می‌برد. به همین ترتیب، فراهم شدن HCO_3^- از تنفس میکروبی تحت شرایط pH مناسب، واکنش را تا زمانی که Ca^{2+} به اندازه کافی در دسترس باشد به سمت راست می‌راند. زمانی که فعالیت گیاهی غلظت CO_2 را در منافذ خاک افزایش دهد، فرایند هوادیدگی با سرعت بیشتری انجام می‌شود. با این حال، واکنش رسوب کربنات کلسیم در طی فصول خشک رخ می‌دهد (۳۴). اگر چه واکنش‌های بالا بیشتر برای محیط‌های آبی توسعه یافته‌اند، با این وجود، این اصول برای سیستم بیوژئوشیمیایی خاک نیز مناسب است (۲۲). بر خلاف سیستم آبی، خاک به‌طور متناوب مرطوب و خشک می‌شود. علاوه بر این، خاک یک سیستم متخلخل است که عمدتاً از کانی‌های سیلیکاتی، ذرات آلی، گازها، محلول‌ها و انواع مختلفی از موجودات زنده شامل قارچ‌ها، باکتری‌ها، نماتدها و ریشه‌ها تشکیل شده است. در محیط خاک، غلظت CO_2 می‌تواند صدها بار بیشتر از CO_2 اتمسفر باشد (۱۵). در این محیط‌ها، کربنات کلسیم در نواحی که محلول خاک در حفره‌ها و اطراف ذرات وجود دارد، رسوب می‌کند. کربنات کلسیم به دلیل حلالیت کم (۰/۰۰۱۴ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر) از جمله اولین کانی‌هایی است که با خشک شدن خاک رسوب می‌کند و Ca^{2+} و HCO_3^- محلول خاک را مصرف می‌کند (۱۵).

شکل ۵ مقاطع نازک تهیه شده از سنگ بستر پروفیل‌های خاک را نشان می‌دهد. در اینجا تصاویر PPL و XPL مربوط به پروفیل‌های ۳، ۶ و ۱۱ به‌عنوان نمونه آورده شده است. در تمامی مقاطع نازک کانی پلاژیوکلاز به فراوانی یافت می‌شود. بنابراین، در اینجا Ca^{2+} آزادشده از کانی پلاژیوکلاز موجود در سنگ‌های بستر آذرین که خاک از آن‌ها تشکیل شده است، از اصلی‌ترین مکانیسم‌های تشکیل کربنات کلسیم (کربن غیر آلی) در خاک می‌باشد. شکل ۵-b به وضوح رسوب کربنات کلسیم را بر روی سنگ بستر آذرین نشان می‌دهد و حاکی از شستشوی کربنات کلسیم از لایه‌های بالایی خاک می‌باشد.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، ذخیره کربن آلی در پروفیل‌های خاک منطقه مورد مطالعه بین ۵/۵۲ تا ۹/۴۸ $kg\ m^{-2}$ و میانگین ۷/۶۳ $kg\ m^{-2}$ می‌باشد. در مقابل، ذخیره کربن غیر آلی در پروفیل‌های خاک بین ۱۴/۴۱ تا ۹۱/۳۴ $kg\ m^{-2}$ می‌باشد و میانگین آن ۳۵/۰۲ $kg\ m^{-2}$ است. ذخیره کربن کل خاک در پروفیل‌ها بین ۱۹/۹۲ تا ۱۰۰/۸۳ $kg\ m^{-2}$ متغیر است. راهب و همکاران (۲۸) میانگین ذخیره کربن آلی، کربن غیر آلی و کربن کل خاک را برای منطقه نیمه‌خشک مورد بررسی در مطالعه خود به ترتیب ۲/۲۳، ۴/۰۵ و ۶/۲۸ $kg\ m^{-2}$ گزارش نمودند.

محاسبات نشان می‌دهد که ذخیره کربن غیر آلی خاک از کل کربن موجود در خاک بین ۷۱/۲ درصد تا ۹۰/۶ درصد متغیر است و به‌طور متوسط سهم ذخیره کربن غیر آلی از کربن کل خاک ۷۷/۵۷ درصد می‌باشد (جدول ۴ و شکل ۶). ذخیره کربن آلی از کل ذخیره کربن خاک نیز بین ۹/۴ درصد تا ۲۸/۸ درصد متغیر است و به‌طور متوسط ۲۲/۴۳ درصد می‌باشد. به‌طور متوسط ذخیره کربن غیر آلی خاک در منطقه مطالعاتی ۴/۲۷ برابر بیشتر از ذخیره کربن آلی خاک می‌باشد. ژانگ و همکاران (۴۴) ذخیره کربن غیر آلی را ۴ برابر بیشتر از ذخیره کربن آلی خاک در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک چین گزارش نمودند؛ بنابراین، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با توجه به نقش کربن غیر آلی خاک در مدیریت خاک و تغییرات ناشی از آن در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی باید به طور خاص و با دقت مورد توجه قرار گیرد. نتایج این یافته‌ها با نتایج سایر محققان که مقدار کربن غیر آلی خاک را ۱ تا ۹ برابر کربن آلی خاک گزارش نمودند، سازگار است.



شکل ۵- تصاویر مقاطع نازک سنگ بستر برخی از پروفیل‌ها. a: سنگ بستر پروفیل ۳، b: سنگ بستر پروفیل ۳ به همراه لایه تجمع کربنات کلسیم روی سنگ بستر، c: سنگ بستر پروفیل ۶ و d: سنگ بستر پروفیل ۱۱

کانی‌های پلاژیوکلاز روی تصاویر مشخص شده‌اند.

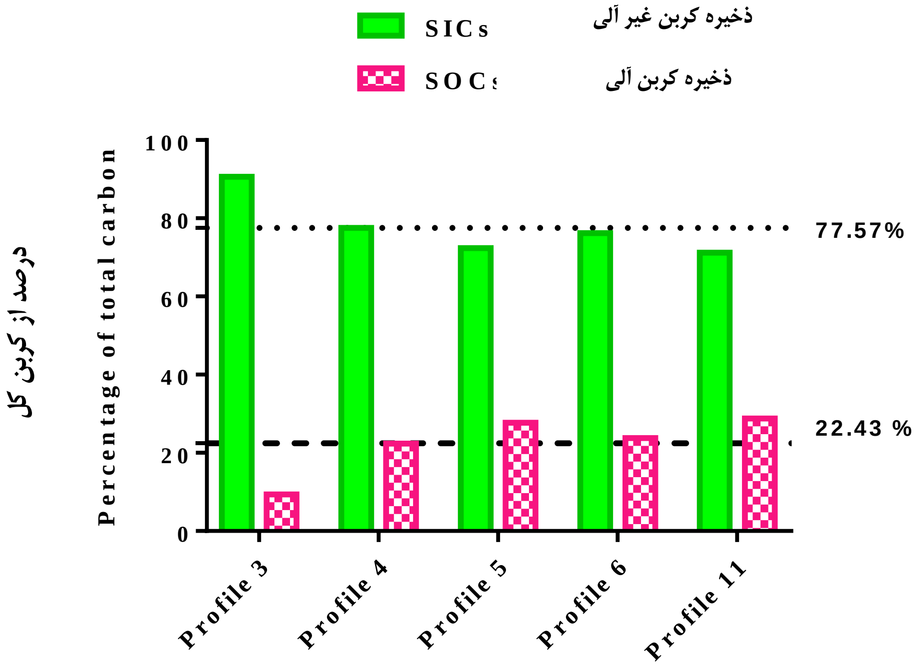
Figure 5- Thin section image of the bedrock of some profiles. a: Profile bedrock No.3, b: Profile bedrock No. 3 with calcium carbonate accumulation layer, c: Profile bedrock No. 6 and d: Profile bedrock No. 11

Plagioclase minerals are marked on the images.

جدول ۴- ذخیره کربن آلی و غیر آلی و نسبت آن‌ها به کربن کل خاک

Table 4- Organic and inorganic carbon storage and their ratio to total carbon

شماره پروفیل Pedon No.	ذخیره کربن آلی SOCs (kg m^{-2})	ذخیره کربن غیر آلی SICs (kg m^{-2})	ذخیره کربن کل STCs (kg m^{-2})	ذخیره کربن غیر آلی/ ذخیره کربن آلی SICs/SOCs	(ذخیره کربن غیر آلی/ ذخیره کربن کل)×۱۰۰ (SICs/STCs)*100	(ذخیره کربن آلی/ ذخیره کربن کل) ×۱۰۰ (SOCs/STCs)*100
Pedon 3	9.48	91.34	100.83	9.63	90.59	9.40
Pedon 4	7.97	27.58	35.56	3.46	77.56	22.41
Pedon 5	5.52	14.41	19.92	2.61	72.34	27.71
Pedon 6	5.83	18.64	24.47	3.19	76.17	23.83
Pedon 11	9.37	23.16	32.53	2.47	71.20	28.80
Mean	7.63	35.026	42.662	4.27	77.57	22.43



شکل ۶- درصد جزء کربن آلی و غیر آلی از کربن کل خاک در پروفیل‌های مورد مطالعه

نقطه‌چین نشان‌دهنده میانگین سهم کربن غیر آلی از کل کربن خاک و خط‌چین نشان‌دهنده میانگین سهم کربن آلی از کل کربن خاک می‌باشد.

Figure 6– Percentage of organic and inorganic carbon portion of total soil carbon for the studied profile

The dotted line represents the average portion of inorganic carbon in the total soil carbon, and the dashed line represents the average portion of organic carbon in the total soil carbon.

وانگ و همکاران (۴۰) گزارش کردند که ذخیره کربن غیر آلی خاک در مناطق نیمه‌خشک چین بیش از ۸۰ درصد از ذخیره کل کربن خاک را شامل می‌شود.

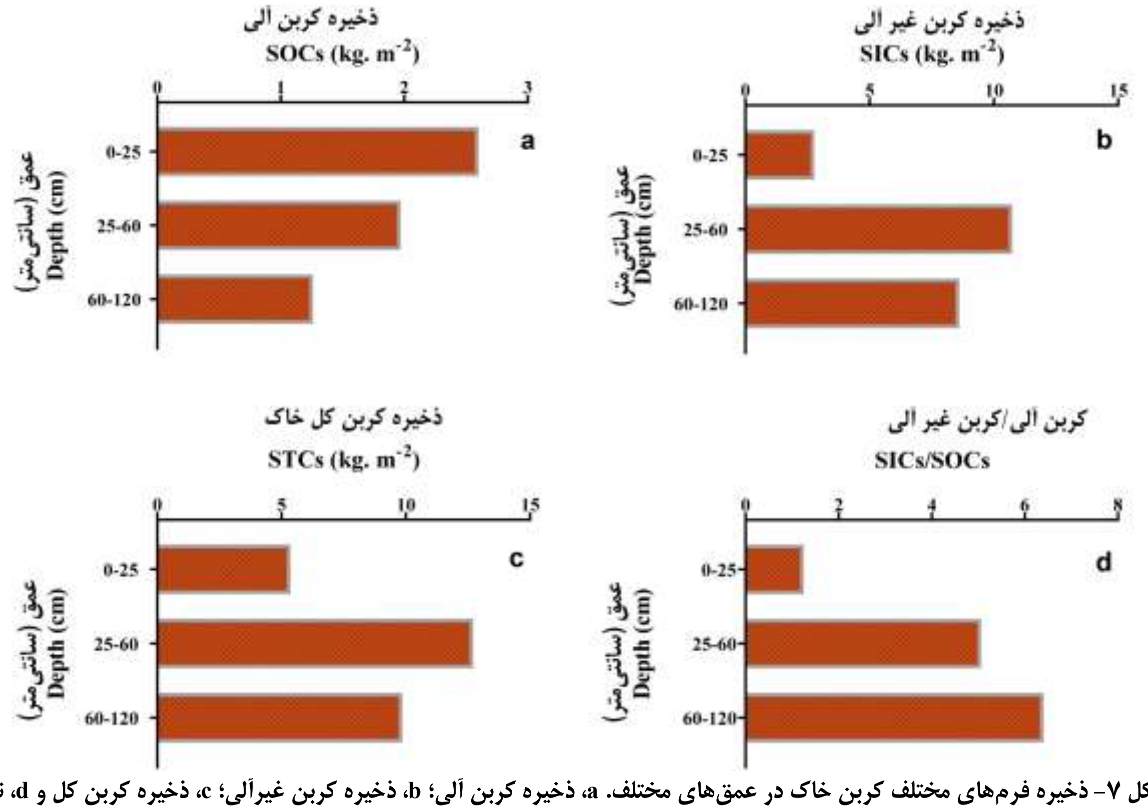
توزیع عمقی کربن خاک

جهت بررسی توزیع عمقی ذخیره کربن آلی و کربن غیر آلی خاک، مقدار این پارامترها با استفاده از توابع اسپلاین برای عمق‌های ۲۵-۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. مقدار کربن آلی خاک و کربن غیر آلی خاک برای عمق‌های مختلف و توزیع عمقی آن‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ذخیره کربن آلی خاک در افق‌های سطحی بیشتر از افق‌های زیر سطحی است و در عمق‌های ۲۵-۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متری به‌طور متوسط ۲/۶، ۱/۹۷ و ۱/۲۶ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. از طرفی، مقدار ذخیره کربن غیر آلی در افق سطحی حداقل است و در افق‌های زیرسطحی، به خصوص در عمق ۶۰-۲۵ سانتی‌متری افزایش می‌یابد. مقدار ذخیره کربن غیر آلی خاک در عمق‌های ۲۵ -۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۲/۷، ۱۰/۷۴ و ۸/۶ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. بنابراین، به نظر

می‌رسد که بیش از ۵۰ درصد از کل ذخیره کربن غیر آلی خاک در عمق ۶۰-۲۵ سانتی‌متری از سطح خاک ذخیره شده است. راهب و همکاران (۲۸) در منطقه نیمه‌خشک مورد بررسی در مطالعه خود، مقدار ذخیره کربن غیر آلی را در عمق‌های ۲۵-۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متری به ترتیب ۳، ۱۴ و ۸۳ درصد گزارش کردند که عمده کربن غیر آلی در عمق بیشتر از ۶۰ سانتی‌متر ذخیره شده است. مقدار ذخیره کربن غیر آلی در عمق‌های ۲۵-۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متری از کل ذخیره کربن غیر آلی خاک در مطالعه حاضر به ترتیب ۱۱/۱، ۵۰/۳ و ۳۸/۷ درصد بدست آمد. راهب و همکاران (۲۸) ذخیره کربن آلی را در عمق‌های ۲۵-۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متری به ترتیب ۳۱، ۳۲ و ۳۷ درصد گزارش نمودند که با مطالعه حاضر روند متفاوت و معکوسی را نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر ذخیره کربن آلی در عمق‌های متناظر به ترتیب ۴۴، ۳۴/۲ و ۲۱/۸ درصد می‌باشد؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که با توجه به ویژگی‌های خاک و شرایط آب و هوایی برای هر منطقه باید مطالعه‌های مجزایی صورت گیرد. ذخیره کربن کل خاک نیز روند مشابهی با ذخیره کربن غیر آلی خاک، نشان داده است و در عمق‌های ۲۵ -۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متری به ترتیب ۵/۴، ۱۲/۷ و ۹/۸ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. در شکل 7-d نسبت کربن غیر آلی خاک به کربن آلی خاک در عمق‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش عمق این نسبت نیز افزایش یافته است و در عمق‌های ۲۵ -۰، ۶۰-۲۵ و ۱۲۰-۶۰ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۱/۲۵، ۵/۱ و ۶/۴ می‌باشد. به نظر می‌رسد افزایش فشار جزئی CO_2 در خاک منجر به انحلال بخشی از کربنات پدوژنیک در خاک سطحی می‌شود و در نتیجه کربنات پدوژنیک حل‌شده و به خاک عمقی منتقل می‌شود و در افق‌های زیرسطحی به دلیل شرایط خشکی و CO_2 کمتر مجدداً متبلور می‌شود (۴۵).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توزیع عمقی و ذخیره شکل‌های مختلف کربن در پروفیل‌های خاک در یک منطقه نیمه‌خشک در جنوب کرمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ذخیره کربن آلی عمدتاً در افق‌های سطحی و ذخیره کربن غیر آلی در افق‌های زیرسطحی بیشتر است.



شکل ۷- ذخیره فرم‌های مختلف کربن خاک در عمق‌های مختلف. a، ذخیره کربن آلی؛ b، ذخیره کربن غیرآلی؛ c، ذخیره کربن کل و d، نسبت کربن غیر آلی به کربن آلی خاک

Figure 7- Storage of organic and inorganic carbon at different depths of the soil profiles. a, storage of soil organic carbon; b, storage of soil inorganic carbon; c, storage of total soil carbon and d, ratio of soil inorganic carbon to soil organic carbon

نسبت ذخیره کربن غیر آلی به کربن آلی به‌طور متوسط ۴/۲۷ می‌باشد. درصد بالای سهم ذخیره کربن غیر آلی خاک از کل کربن خاک، نشان می‌دهد که کربن غیر آلی نقش بسیار مهمی در مناطق نیمه خشک ایفا می‌کند. تقریباً ۸۹ درصد از کربن غیر آلی خاک و حدود ۸۰ درصد از کل کربن خاک در افق‌های زیرسطحی خاک (زیر ۲۵ سانتی‌متر) تجمع یافته است که نشان‌دهنده اهمیت خاک زیرسطحی برای ذخیره کربن در مناطق نیمه‌خشک می‌باشد.

منابع

1. Ajami M., Heidari A., Khormali F., Gorji M., and Ayoubi S. 2016. Environmental factors controlling soil organic carbon storage in loess soils of a subhumid region, northern Iran. Geoderma 281: 1-10.
2. Alidoust E., Afyuni M., Hajabbasi M.A., and Mosaddeghi M.R. 2018. Soil carbon sequestration potential as affected by soil physical and climatic factors under different land uses in a semiarid region. Catena 171: 62-71.
3. Bishop T.F.A., McBratney A.B., and Laslett G.M. 1999. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. Geoderma 91: 27-45.
4. Bower C.A., and Hatcher J.T. 1966. Simultaneous determination of surface area and cation exchange capacity. Soil Science Society of America Journal 30: 525–527.
5. Bughio M.A., Wang P., Meng F., Qing C., Kuzyakov Y., Wang X., and Junejo S.A. 2016. Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil. Geoderma 262: 12-19.
6. Du C., and Gao Y. 2020. Opposite patterns of soil organic and inorganic carbon along a climate gradient in the alpine steppe of northern Tibetan Plateau. Catena 186: 104366.
7. Ekelund F., Rønn R., and Christensen S. 2001. Distribution with depth of protozoa, bacteria and fungi in soil profiles from three Danish forest sites. Soil Biology and Biochemistry 33: 475–481.
8. Eshel G., Fine P., and Singer M.J. 2007. Total soil carbon and water quality: an implication for carbon sequestration. Soil Science Society of America Journal 71: 397-405.
9. Eswaran H., Reich F.P., Kimble J.M., Beinroth F.H., Padamnabhan E., Moncharoen P. 2000. Global carbon stocks. In: Lal R., Kimble J.M., Eswaran H., Stewart B.A. (Eds.), Global Climate Change and Pedogenic Carbonates. CRC/Lewis, Boca Raton, FL.
10. Gebeyehu G., Soromessa T., Bekele T., and Teketay D. 2019. Carbon stocks and factors affecting their storage in dry Afromontane forests of Awi Zone, northwestern Ethiopia. Journal of Ecology and Environment 43: 1-18.
11. Gile L.H., Peterson F.F., and Grossman R.B. 1966. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soil. Soil Science 101: 347-360.
12. Han X., Gao G., Chang R., Li Z., Ma Y., Wang S., and Fu B. 2018. Changes in soil organic and inorganic carbon stocks in deep profiles following cropland abandonment along a precipitation gradient across the Loess Plateau of China. Agriculture, Ecosystems and Environment 258: 1-13.
13. Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., and Andrews J.A. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. Biogeochemistry 48: 115-146.
14. Horton Jr R. 2002. Methods of Soil Analysis: Part 4, Physical Methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America.
15. Kimble J.M., and Follett R.F. 2000. The potential of US grazing lands to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. CRC press.
16. Lee M.R., Hodson M.E., and Langworthy G. 2008. Earthworms produce granules of intricately zoned calcite. Geology 36: 943-946.
17. Li C., Li Q., Zhao L., Ge S., Chen D., Dong Q., and Zhao X. 2016. Land-use effects on organic and inorganic carbon patterns in the topsoil around Qinghai Lake basin, Qinghai-Tibetan Plateau. Catena 147: 345-355.
18. Liu W., Wei J., Cheng J., and Li W. 2014. Profile distribution of soil inorganic carbon along a chronosequence of grassland restoration on a 22-year scale in the Chinese Loess Plateau. Catena 121: 321-329.
19. Lorenz K., and Lal R. 2018. Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems. Springer.
20. Mikhailova E.A., and Post C.J. 2006. Effects of land use on soil inorganic carbon stocks in the Russian Chernozem. Journal of Environmental Quality 35: 1384-1388.
21. Monger H.C., Kraimer R.A., Khresat S., Cole D.R., Wang X., Wang J. 2015. Sequestration of inorganic carbon in soil and groundwater. Geology 43: 375–378.
22. Monger H.C., and Martinez-Rios J.J. 2002. Inorganic carbon sequestration in grazing lands. In: Follett R.F., Kimble J.M., Lal R. (Eds.), The Potential of US Grazing Lands to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Gas Effect. Lewis Publishers, Boca Raton, USA, pp. 87–118.
23. Nelson D.W., Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Agron. Monger, No Vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI., pp. 539–577

24. Olaya-Abril A., Parras-Alcántara L., Lozano-García B., and Obregón-Romero R. 2017. Soil organic carbon distribution in Mediterranean areas under a climate change scenario via multiple linear regression analysis. Science of the Total Environment 592: 134-143.
25. Philander G., and Philander S.G. 2008. Encyclopedia of global warming and climate change: AE (Vol. 1). Sage.
26. Poeplau C., Vos C., and Don A. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. Soil 3: 61-66.
27. Raheb A., Heidar, A., and Mahmoodi S. 2016. Storage of Organic and Inorganic Carbon in Arid-Semihumid Soils: A Case Study of the Rangelands of Northwestern Iran. Soil Science 181: 473-486.
28. Raheb A., Heidari A., and Mahmoodi S. 2017. Organic and inorganic carbon storage in soils along an arid to dry sub-humid climosequence in northwest of Iran. Catena 153:66-74.
29. Rahimi J., Ebrahimpour M., and Khalili A. 2013. Spatial changes of Extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran, Theoretical and Applied Climatology 112: 409–418.
30. Rasmussen C. 2006. Distribution of soil organic and inorganic carbon pools by biome and soil taxa in Arizona. Soil Science Society of America Journal 70: 256–265.
31. Rawlins B.G., Henrys P., Breward N., Robinson D.A., Keith A.M., and Garcia-Bajo M. 2011. The importance of inorganic carbon in soil carbon databases and stock estimates: a case study from England. Soil Use and Management 27: 312-320.
32. Rodriguez J.B., Self J., and Arriaga F.J. 2016. A simple, gravimetric method to quantify inorganic carbon in calcareous soils. Soil Science Society of America Journal 80: 1107-1113.
33. Schaetzl, R. J., and Thompson, M. L. 2015. Soils: Genesis and Geomorphology, Cambridge university press.
34. Schlesinger W.H. 2017. Inorganic carbon: global carbon cycle. In Encyclopedia of soil science (pp. 1203-1205). CRC Press.
35. Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
36. Soil Science Division Staff. 2017. Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
37. Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
38. Sreenivas K., Dadhwal V.K., Kumar S., Harsha G.S., Mitran T., Sujatha G and Ravisankar T. 2016. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. Geoderma 269: 160-173.
39. Stanbery C.A., Pierce J.L., Benner S.G., and Lohse K. 2017. On the rocks: Quantifying storage of inorganic soil carbon on gravels and determining pedon-scale variability. Catena 157: 436-442.
40. Wang J.P., Wang X.J., Zhang J., and Zhao C.Y. 2015. Soil organic and inorganic carbon and stable carbon isotopes in the Yanqi Basin of northwestern China. European Journal of Soil Science 66: 95-103.
41. Wang, Y., Li, Y., Ye, X., Chu, Y., and Wang, X. 2010. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. Science of the Total Environment, 408: 1925-1931.
42. Wang Z.P., Han X.G., Chang S.X., Wang B., Yu Q., Hou L.Y., and Li L.H. 2013. Soil organic and inorganic carbon contents under various land uses across a transect of continental steppes in Inner Mongolia. Catena 109: 110-117.
43. Yang Y., Fang J., Ji C., Ma W., Mohammat A., Wang S., and Smith P. 2012. Widespread decreases in topsoil inorganic carbon stocks across China's grasslands during 1980s–2000s. Global Change Biology 18:3672-3680.
44. Zhang F., Wang X., Guo T., Zhang P., and Wang J. 2015. Soil organic and inorganic carbon in the loess profiles of Lanzhou area: implications of deep soils. Catena 126: 68-74.
45. Zhao W., Zhang R., Huang C., Wang B., Cao H., Koopal L.K., and Tan W. 2016. Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou Watershed on the loess plateau. Catena 139: 191-198.

Journal of Water and Soil
Vol. 35, No. 1, March-April 2021, p. 33-48

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۴۸-۳۳

Organic and Inorganic Carbon Storage in the Soils of Sardooeyeh Semi-arid Region in South of Kerman

H.R. Rafiei[1]- A. Jafari[2*]- A. Heidari[3]- M.H. Farpoor[4]- A. Abbasnejad[5]
Received: 02-09-2019
Accepted: 26-07-2020

Introduction: Soil carbon (C) sequestration is recognized as a potentially significant option to off-set the elevation of global atmospheric carbon dioxide (CO_2) concentrations. Soils are the main sink/source of carbon and also, an important component of the global C cycle. Total soil carbon (C) comprises of the soil organic C (SOC) and the soil inorganic C (SIC) components. The soil inorganic C (SIC) stock mainly consists of carbonates and bicarbonates. Processes governing the dynamics of the soil carbon stock differ among ecoregions and strongly interact with soil properties. Understanding the distribution of organic and inorganic carbon stocks in soil profiles is essential for assessing carbon storage at the regional and global scale. Although global estimates provide a general view of carbon stock levels, accurate local estimates and factors affecting soil carbon dynamics are very important. As a result, there is an essential requirement for accurately estimating the distribution of carbon reserves and their differences with regard to soil properties.

Materials and Methods: The study area is located in the Sardooeyeh region, South of Kerman, under semiarid conditions. A total of 5 soil profiles were excavated. Percentage of coarse fragments (> 2 mm) using a 2 mm sieve, total organic C by the $K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4 oxidation method of Walkley-Black, soil inorganic carbon using the Gravimetric carbonate meter method were determined. Bulk density was measured by drying core samples in an oven overnight and dividing the weight of dry soil by the volume of the core occupied by the soil after correction for coarse fragments.

Results and Discussion: Organic carbon in the surface horizons of all profiles is maximum due to vegetation and decreases with increasing soil depth. As the altitude increased, the amount of organic carbon increased in the surface horizons. Lower temperature and higher humidity at higher altitudes lead to the lower organic matter decomposition and consequently higher organic carbon content of the soil. Although the upper soil layers had the maximum soil organic C content, the maximum soil inorganic C content was observed in the sub-surface layers. The soil organic carbon storage was between 5.52 to 9.48 kg m^{-2} and the storage of soil inorganic carbon in profiles was between 14.41 and 91.34 kg m^{-2}. The total soil carbon storage in the profiles varied between 19.92 to 100.83 kg m^{-2} and the average was 42.66 kg m^{-2}. The average of soil organic carbon storage in 0-25, 25-60, 60-120 cm depths were 2.6, 1.97 and 1.26 kg m^{-2}, respectively. The amount of soil inorganic carbon storage in 0 -25, 25-60 and 60-120 cm depths were equal to 2.7, 10.40 and 8.26 kg m^{-2}, respectively. Therefore, it seems that more than 50% of the total soil inorganic carbon storage is stored at a depth of 25-60 cm from the soil surface. The portion of inorganic carbon storage of total soil carbon was 77.5%, and about 89% of it was stored in sub-surface horizons (below 25 cm). The portion of organic carbon storage of total soil carbon was 22.4%. It seems that an increase in the partial pressure of CO_2 in soils leads to some dissolution of the pedogenic carbonate in the top soil. Dissolved pedogenic carbonate transfers to the deep soil and then re-crystallizes under relatively dry conditions and low CO_2.

Conclusion: The results showed that soil organic carbon storage was mostly higher in surface horizons, and soil inorganic carbon storage was higher in sub-surface horizons. On average, the ratio of soil inorganic carbon storage to soil organic carbon storage was 4.27. The high percentage of soil inorganic carbon storage in total soil carbon, shows that inorganic carbon plays a very important role in semi-arid regions. Almost 89% of the soil

1, 2 and 4- Ph.D. Student, Assistant Professor and Professor, Department of Soil Science, Agriculture Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, respectively.
(*- Corresponding Author Email: a.jafari@uk.ac.ir)
3- Professor, Department of Soil Science Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj
5- Associate Professor, Department of geology, Faculty of sciences, Shahid Bahonar University of Kerman
DOI: 10.22067/jsw.v35i1.82133

inorganic carbon content and about 80% of the total soil carbon were accumulated in the sub-surface horizon of soil (below 25 cm), indicating the importance of sub-surface soil for storing carbon in semi-arid regions.

Keywords: Climate change, Deep soil carbon, Total soil carbon, Global warming